

## ВЛИЯНИЕ ЛУНОК НА АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛАСТИНЫ, ШАРА И КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА

Ю. С. Боднарчук, асп.

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Аннотация.** Выполнен численный анализ влияния количества и форм лунок на сопротивление тел канонической формы.

**Ключевые слова:** сопротивление, шар, пластина, круговой цилиндр, лунка.

**Анотація.** Виконано числовий аналіз впливу кількості і форм лунок на опір тіл канонічної форми.

**Ключові слова:** опір, куля, пластина, круговий циліндр, лунка.

**Abstract.** The numerical analysis of the influence of the dimples number and shapes on the drag of canonically shaped bodies has been performed.

**Keywords:** drag, sphere, plate, round cylinder, dimple.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Важнейшей задачей гидромеханики как с точки зрения теории, так и практики, является исследование взаимодействия твердого тела и жидкости. В данном случае – это исследование сопротивления движению тел различной конфигурации.

Впервые эффект влияния лунок был обнаружен экспериментально при обтекании мяча для гольфа. Попытки распространить этот эффект на другие тела успеха не имели. Тем не менее работы в этом направлении интенсивно продолжаются во многих странах мира. В судостроении проблема снижения сопротивления в эпоху энергетического кризиса стала более актуальной. В связи с этим можно считать целесообразным продолжение исследования влияния количества, формы и места расположения лунок по поверхности тел различной формы.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Существует большое количество источников, в которых описываются свойства мяча для гольфа\*. Однако при неясной природе эффекта чисто механически пытались расположить лунки на поверхности различных тел сложной формы\*\*. В некоторых случаях данный эффект дает положительный результат, но в основном технологически сложная поверхность после изготовления и проверки показывает отрицательный результат или слишком малый для перспективности ее применения.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** – исследование возможности применения эффекта лунки для снижения сопротивления тел канонической формы.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Все тела с точки зрения механики жидкости можно разделить на две группы: хорошо- и плохообтекаемые.

Рассмотрим, например, сферу как одного из представителей плохообтекаемых тел. Хорошо известно, что зависимость сопротивления от числа Рейнольдса можно разделить на три области: докритическую, критическую и закритическую. В докритической области коэффициент сопротивления имеет значения около 0,45. В критической области этот коэффициент резко уменьшается и достигает минимального значения 0,22. В закритической области он постепенно увеличивается. Сама критическая область является областью перехода от ламинарного течения к турбулентному. Известно, что режим течения оказывает существенное влияние как на сопротивление, так и на подъемную силу. От состояния обтекаемой поверхности зависит значение критического числа Рейнольдса: с возрастанием шероховатости оно уменьшается [2].

Для численного решения задачи обтекания исследуемых тел воспользуемся программным CFD комплексом FlowVision v.2.3. В процессе моделирования были созданы твердотельные модели пластины, шара и цилиндра в CAD системе Rhinoceros 4.0 и экспортированы в формате «stl» в FlowVision. Далее в препроцессоре выбрана математическая модель «несжимаемая жидкость», в которой уравнения Рейнольдса были дополнены уравнениями  $k-\epsilon$  модели турбулентности. В процессе исследования выполнен поиск оптимальных параметров моделирования, таких, как шаг сетки, степень адаптации сетки, шаг по времени,

\* Режим доступа: <http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0215.shtml>; <http://iloveba cteria.com/golf.htm>, <http://www.veryst.com/project/golf-ball-impact-simulation>.

\*\* Режим доступа: <http://www.dr-lex.be/hardware/minisub.html>; <http://lexusenthusiast.com/2009/06/10/dimpled-lexus-ls-460l-to-debut-at-u-s-open>; <http://www.fainaidea.com/archive/s/11239>.

а также учитывалось влияние локального измельчения сетки в местах расположения лунок.

Рассмотрим геометрию шара с лунками (рис. 1).

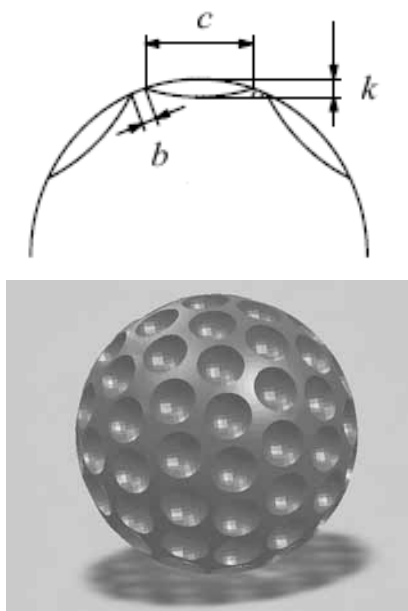


Рис. 1. Геометрия поверхности сферы с лунками ( $D = 1,0$  м;  $b = 0,01$  м;  $c = 0,1$  м;  $k = 0,05$  м;  $k/D = 0$ )

Сравнение гладкого шара и шара с лунками (рис. 2, 3) показывает, что при наличии лунок на поверхности шара критическое значение лобового сопротивления уменьшается, а за критическое значение увеличивается. При отношении  $k/D = 0,05$ , где  $k$  – глубина лунки, а  $D$  – диаметр шара,  $Re = 1,8 \cdot 10^5$  и  $C_x = 0,35$ .

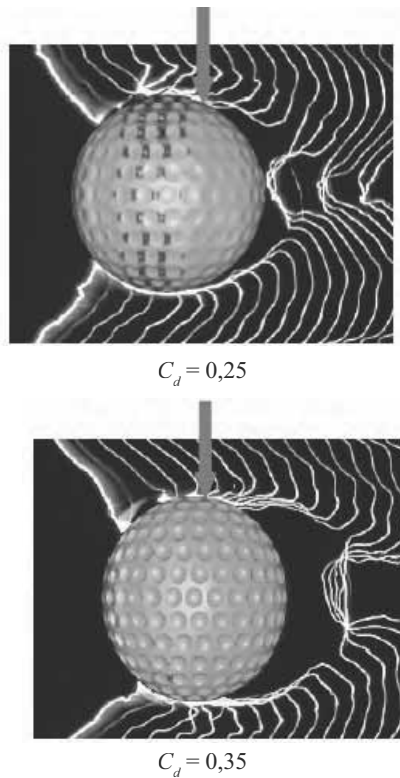
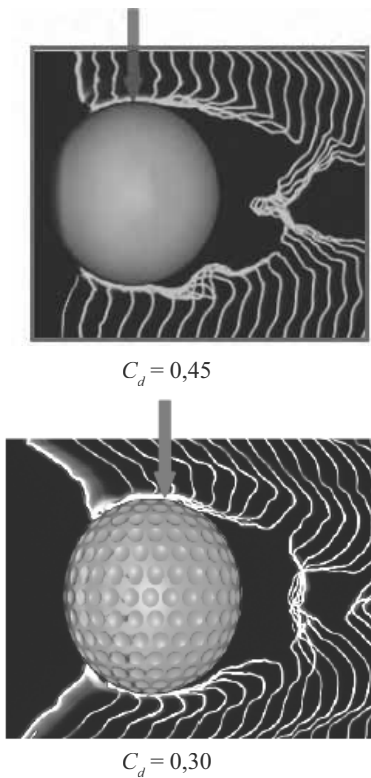


Рис. 4. Визуализация эффекта [3]

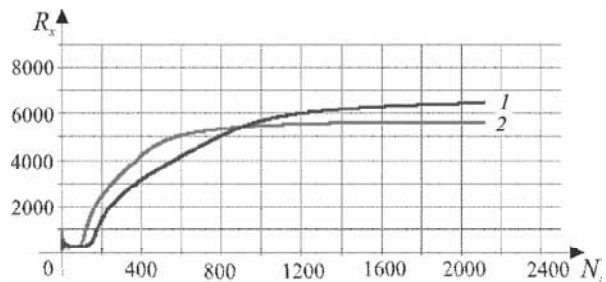


Рис. 2. Сравнение кривых сопротивления гладкого шара и шара с лунками при скорости 15 м/с: 1 – гладкий шар; 2 – шар с лунками

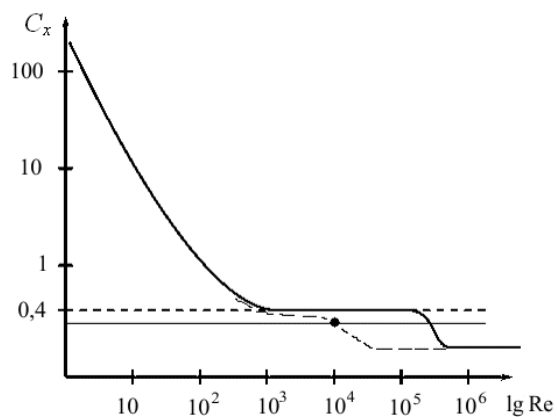


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления шара от числа Рейнольдса

У сферы с лунками точка отрыва смещается вниз по течению (рис. 4).

Далее рассмотрим обтекание плоской пластины. Сначала лунки на пластине располагали равномерно, аналогично шару для гольфа (рис. 5,а). Это была пластина с 32 полусферными лунками и параметрами (см. рис. 5,б).

После получения положительного результата (рис. 6) было принято решение упростить конструкцию (пластина с поперечной лункой) (рис. 7). Исходя из структуры и толщины пограничного слоя на пластине [3], наилучшие результаты получили при  $b/A = 0,5...0,8$ .

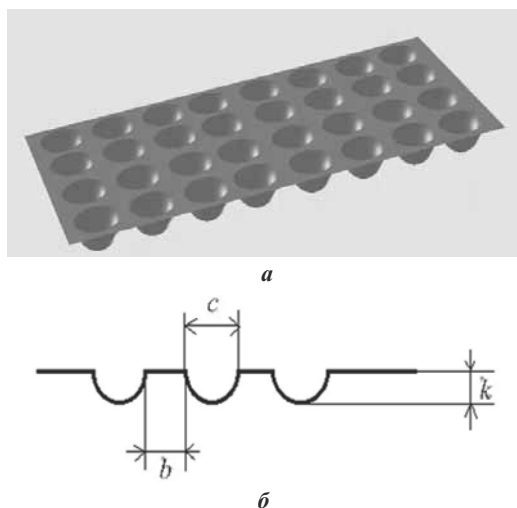


Рис. 5. Геометрия поверхности пластины с лунками

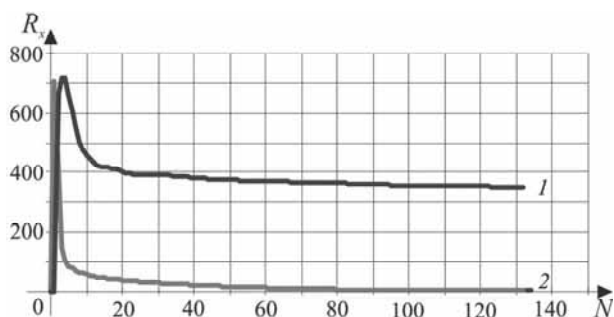


Рис. 6. Сравнение кривых сопротивления пластины и пластины с лунками при скорости 3 м/с: 1 – гладкая пластина; 2 – пластина с лунками

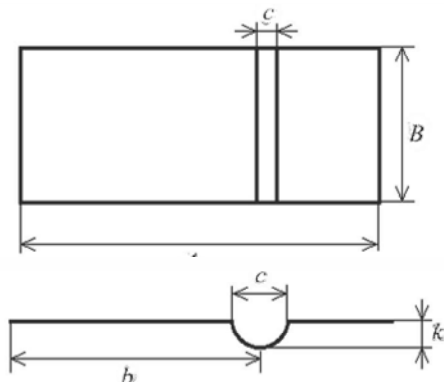


Рис. 7. Геометрия поверхности упрощенной пластины с лунками

Изменяя место расположения и параметры лунок, определили оптимальное решение при условии, что основные размеры пластины –  $A = 10$  м и  $B = 5$  м (рис. 8).

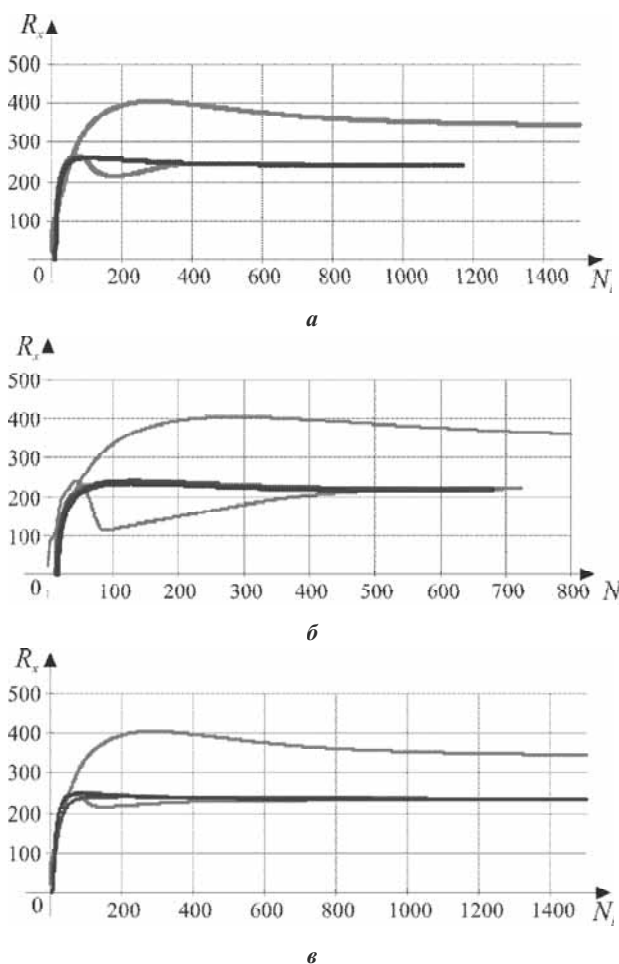


Рис. 8. Сравнение кривых сопротивления гладкой пластины и пластины с лунками при скорости 15 м/с, с параметрами: а –  $C = 0,5$  м;  $k = 0,25$  м; б –  $C = 0,25$  м;  $k = 0,125$  м; в –  $C = 0,1$  м;  $k = 0,05$  м

В результате получили следующее снижение сопротивления:

- при ширине лунки 0,5 м – на 39,4 %;
- при ширине лунки 0,25 м – на 34,7 %;
- при ширине лунки 0,1 м – на 32,6 %.

Оптимальные места расположения и параметры лунок, когда основные размеры пластины  $A = 50$  м и  $B = 20$  м, приведены на рис. 9.

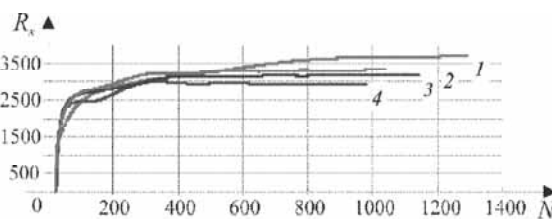
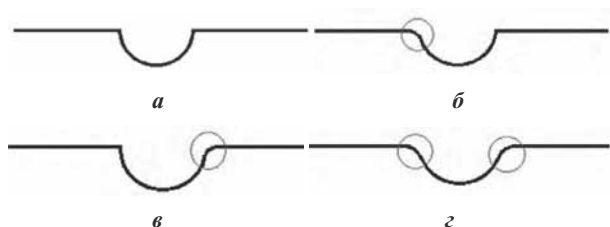


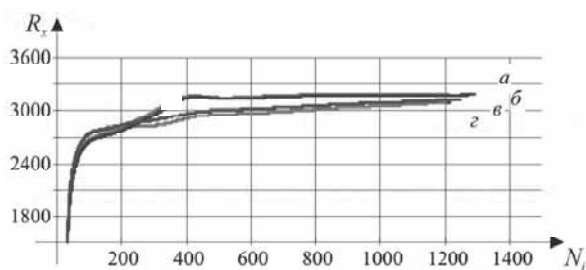
Рис. 9. Сравнение кривых сопротивления гладкой пластины и пластины с лунками при скорости 15 м/с: 1 – гладкая пластина; 2 –  $b = 11$  м; 13 м и  $c = 1$  м; 3 –  $b = 11$  м и  $c = 1,5$  м; 4 –  $b = 11$  м; 13 м и  $c = 1,5$  м

Из графика рис. 9 можно сделать вывод, что по отношению к гладкой пластине с лунками при скорости 15 м/с, с приведенными параметрами сопротивление пластины снижается на 20 %, 14 %, 9,5 % соответственно.

В процессе исследования влияния самой конструкции лунки на уменьшение сопротивления были поочередно закруглены передняя, задняя кромка лунки и обе кромки вместе (рис. 10, 11).



**Рис. 10.** Геометрия лунки: *а* – лунка с прямыми кромками; *б* – с передней закругленной кромкой; *в* – с задней закругленной кромкой; *г* – с обеими закругленными кромками



**Рис. 11.** Сравнение кривых сопротивления пластины с разной геометрией лунки при скорости 15 м/с

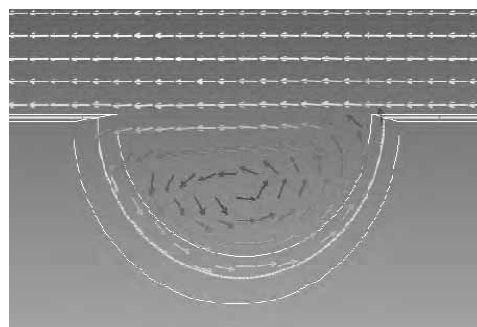
Сравнение лунки с острыми кромками и лунки с закругленными показало снижение сопротивления:

- лунки с закругленной передней кромкой (*б*) – еще на 3,2 %;
- лунки с закругленной задней кромкой (*в*) – еще на 0,2 %;
- лунки с закругленными двумя кромками (*г*) – еще на 2,3 %.

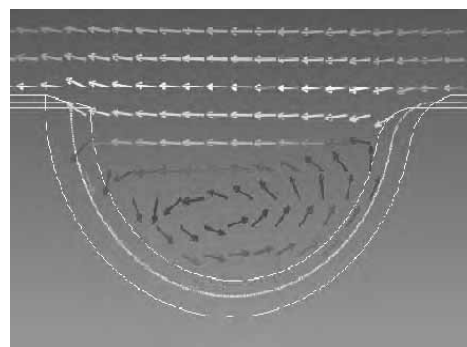
Анализ визуализации поля скоростей в лунках различной конфигурации (рис. 12) показал, что внутри лунки скорость уменьшается, а векторы создают макровихрь, за счет чего в центре лунки давление снижается.

При визуализации поля давления (рис. 13) можно наблюдать, что после лунки с закругленной передней кромкой следует резкое снижение давления.

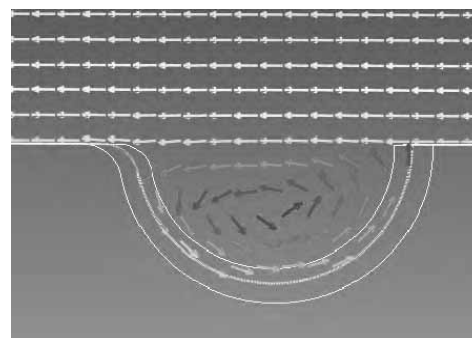
Так как закругление передней кромки показало положительный результат, был проведен ряд опытов, направленных на нахождение оптимального радиуса закругления. Результаты этих опытов приведены в табл. 1.



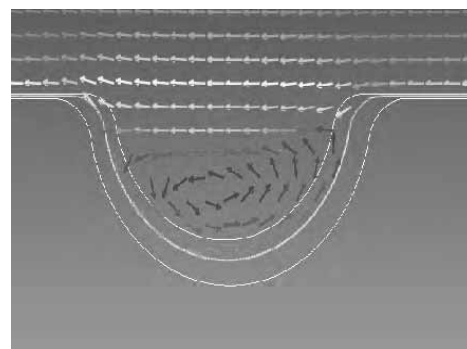
*а*



*б*



*в*



*г*

**Рис. 12.** Поле скоростей в лунках различной конфигурации (значения *а–г* см. на рис. 10)

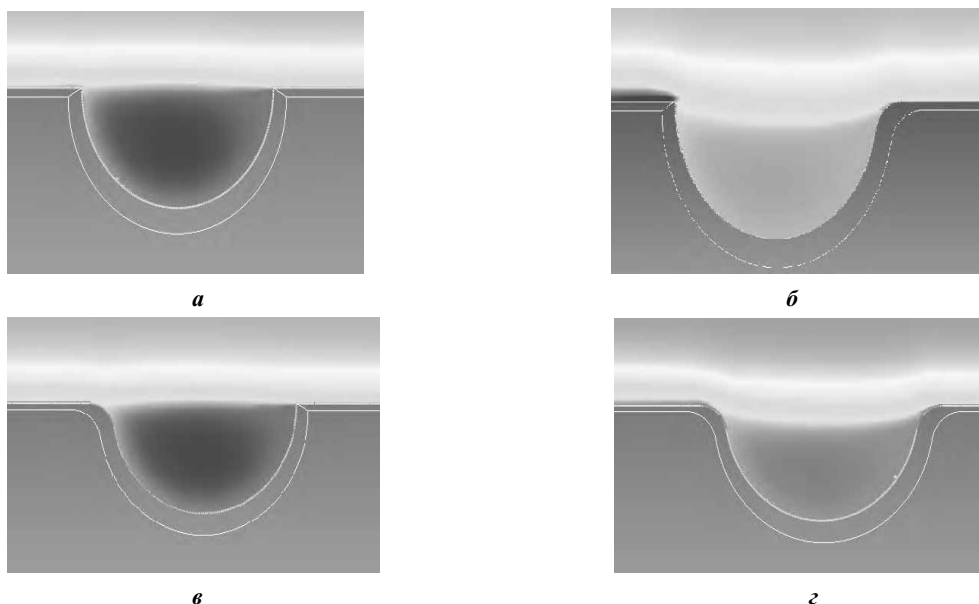


Рис. 13. Поле давлений в лунках различной конфигурации

Таблица 1. Определение оптимального радиуса закругления передней кромки лунки

Номер	Радиус закругления, м	Значение сопротивления	Процент изменения сопротивления по отношению к R <sub>0</sub> , %
0	0	3195	0
1	0,1	3188	0,22
2	0,2	3093	3,19
3	0,3	3095	3,13
4	0,4	3024	5,35
5	0,5	3008	5,85
6	0,6	2971	7,01
7	0,7	2951	7,64
8	0,8	2932	8,23
9	0,9	2913	8,83
10	1	2911	8,89
11	1,5	2812	11,99
12	3	2686	15,93
13	5	2640	17,37
14	10	2540	20,50
15	15	2468	22,75
16	20	2423	24,16
17	50	2262	29,20
18	100	2165	32,24
19	200	2118	33,71
16	20	2423	24,16

При визуализации поля давления в лунке с закруглением 200 м можно наблюдать резкое падение давления за лункой, а на визуализации поля скоростей – перепад скорости по длине лунки (рис. 14, 15).

Далее исследуем круговой цилиндр малого удлинения с закрепленными концами. Цилиндр малого удлинения характеризуется прежде всего относительным удлинением  $\lambda = L/B$ , где  $L$  – длина цилиндра, а  $B$  – ширина. К цилиндрам малого удлинения будем

относить цилиндры удлинением  $\lambda < 10$ . При обтекании цилиндров такого вида закрепления нет перетекания потоков по концам цилиндра, т. е. в месте крепления цилиндра затекание по торцу не происходит. Как и в случае обтекания шара, в диапазоне малых чисел Re наблюдается явление кризиса сопротивления цилиндра, при котором коэффициент лобового сопротивления снижается. Данное явление кризиса связано с переходом пограничного слоя на поверхности

цилиндра из ламинарного состояние в турбулентное [1].

На рис. 16 приведена геометрия кругового цилиндра с лунками основными размерами  $A = 102$  м и  $B = 14,8$  м.

При подборе оптимального места расположения, количества и формы лунок было исследовано семь мо-

делей цилиндров (рис. 17). Наилучшие результаты были получены при установлении двух лунок диаметром 1 м.

Анализируя визуализацию поля давления в лунках на поверхности цилиндра, можно видеть, что внутри лунок давление понижено (рис. 18). Это позволяет изменить картину распределения давления по поверхности кругового цилиндра.

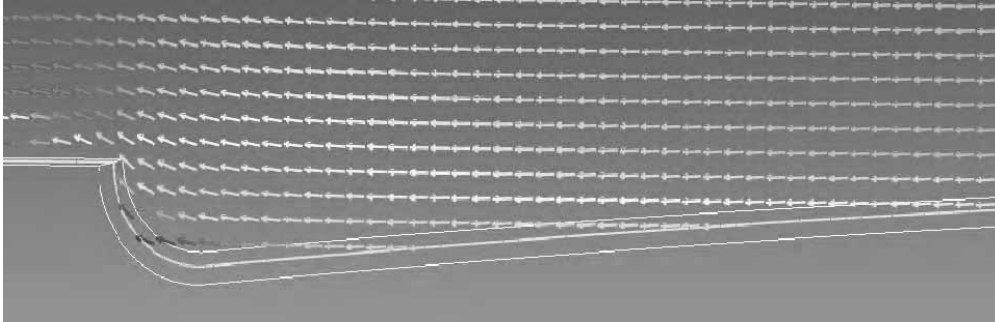


Рис. 14. Поле скоростей в лунке с закруглением 200 м

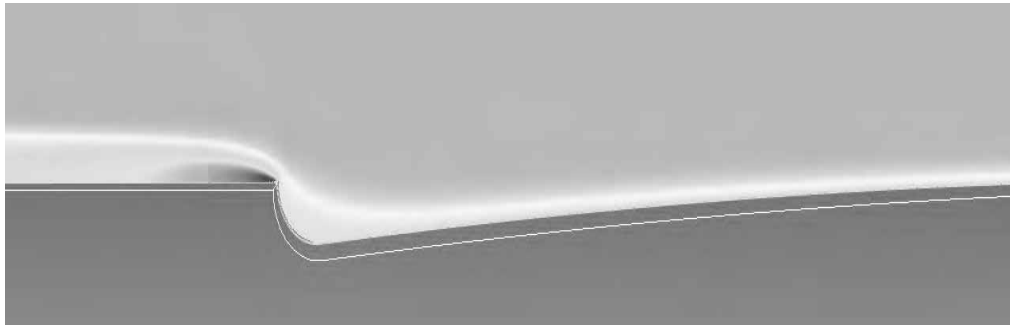


Рис. 15. Поле давления в лунке с закруглением 200 м

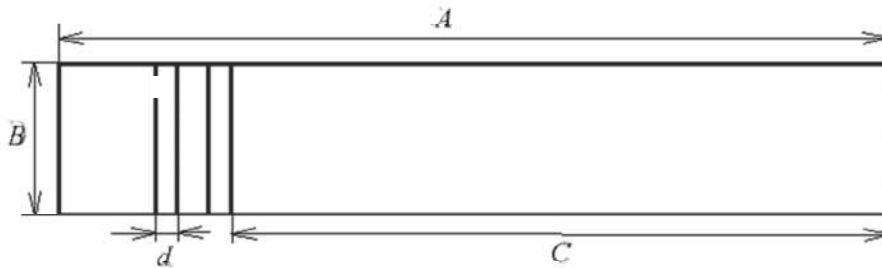


Рис. 16. Геометрия поверхности кругового цилиндра с лунками

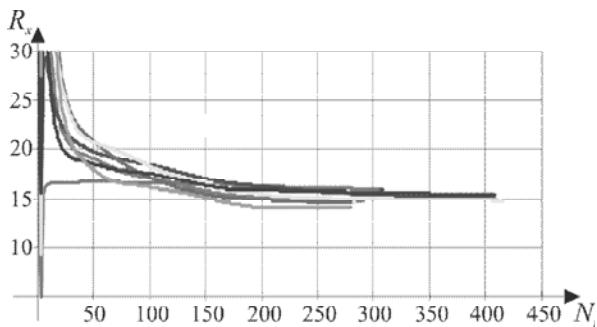


Рис. 17. Сравнение кривых сопротивления кругового цилиндра и кругового цилиндра с лунками при скорости 14 м/с

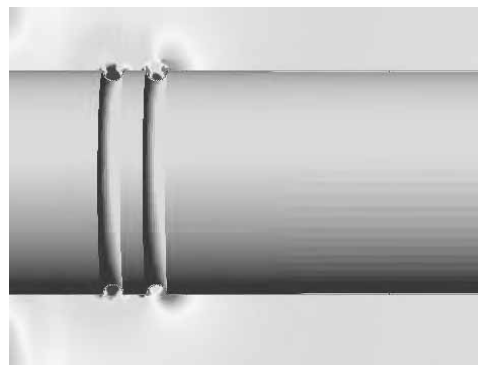


Рис. 18. Поле давлений в лунках на поверхности цилиндра при скорости 14 м/с

### ВЫВОДЫ

1. С целью уменьшения сопротивления пластин, шара и кругового цилиндра исследован один из способов управления пограничным слоем – эффект лунки.

2. Используя программный комплекс Flow Vision, смоделировали данный эффект при обтекании мяча для гольфа как первичный вариант этого эффекта.

3. Проведенная верификация размеров, количества и места расположения лунок на поверхностях плоской пластины и кругового цилиндра для получе-

ния оптимальных результатов лунки показала снижение сопротивления:

- для шара с лунками при скорости 15 м/с – на 14 %;
- для пластины с лунками длиной 10 м – на 39 %;
- для пластины с лунками длиной 50 м – на 20 %;
- для кругового цилиндра с лунками при скорости 14 м/с – на 11 %.

4. В дальнейшем полученные результаты будут применены для исследования эффективности лунки на различных судовых поверхностях.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Девнин, С. И.** Силы, действующие на цилиндр малого удлинения [Текст] / С. И. Девнин //Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций. – Л., 1983 – С. 101.
- [2] **Шлихтинг, Г.** Пограничный слой на пластине [Текст] / Г. Шлихтинг // Теория пограничного слоя. – М., 1974. – С. 132.
- [3] **Katsumi, Aoki.** Aerodynamic characteristic and flow pattern on dimples structure of a sphere [Text] / Koji Muto // Hiroo Okanaga and Yasuki Nakayama. – Flucom 2009. – P. 7.

---

© Ю. С. Боднарчук

Надійшла до редколегії 11.10.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК  
д-р техн. наук, проф. *В. О. Некрасов*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 4, 2013